

# 마이크로스트립 원형 편파 8x2 위상 배열 안테나

\*윤재승\*, 이영주\*, 박위상\*

\*포항공과대학교 전자전기공학과, 전자파특화연구센터

## Microstrip 8x2 circularly polarized phased array antenna

\*Jae-Seung Yun\*, Youngju Lee, Wee Sang Park\*

\* Department of Electronic and Electrical Engineering, Microwave Application Research Center  
Pohang University of Science and Technology

### ABSTRACT

A microstrip circularly polarized 8x2 linear phased array antenna with four 4-bit phase shifters is designed at 10 GHz. The 180° and 90° sections of the phase shifter are of the switched line type, and the rests are of the loaded line type. A 2x2 sequential sub-array is adopted for a broad axial ratio bandwidth. The construction of the array antenna is of the tile type placing the phase shifters on the same layer containing the feed network. The element spacing is chosen to be 0.45 λ<sub>0</sub> to exclude the grating lobe. Measurement results show a gain of 9.69 dB at broadside and 8.3 dB at the beam-tilt angle of 16° by imposing a progressive phase of 90°.

### I. 서론

위상 변위기(phase shifter)는 배열 소자에 위상차를 주어 시스템의 기계적인 회전 없이 빠른 위상 천이를 얻을 수 있기 때문에 위상 배열 안테나의 핵심 부분으로 그 중요성이 더해 지고 있다. 초기에는 페라이트를 이용한 전자식 변위기가 연구되었으나 반도체 소자를 이용한 변위기가 개발되기 시작하여 처음으로 PIN 다이오드 변위기가 등장하였다. 그 후 GaAs FET, 베랙터(varactor) 등과 같은 소자를 이용한 변위기도 이용되었다. 이 중 FET를 이용한 능동 위상 변위기는 변위기 자체에 이득을 주므로 최근에 많이 사용되는 추세에 있다. 하지만 정확한 위상 값이나 소형의 변위기를 요구하는 경우에 있어서 다소의 삽입손실(insertion loss)을 희생하더라도 PIN 다이오드를 이용한 변위기를 사용한다.

본 논문에서는 4 비트 디지털 위상 변위기를 설계하고 이를 8x2 원형 편파 위상 배열 안테나와 결합하여 전체 안테나 시스템을 설계하였다. 2x2를 sub-array로 하여 각각 하나의 변위기와 효율적으로 결합할 수 있는 방법으로 기존의 brick 형태가 아닌 tile 형태를 선택하였다. Brick 형태의 위상 배열 안테나는 위상 변위기를 각각 만들어 급전선과 radiator 사이를 coaxial 급전하는 방법으로 재현성이 우수하지만 급전에 따른 손실과 함께 두께가 두꺼워진다는 단점을 가진다. 이에 반하여 급전선과 위상 변위기를 한 기판에 제작하고 이를 aperture를 통해서 radiator에 급전하는 방법은 효율이 좋고 compact 하며 기타 다른 회로와의 조합도 쉽다는 장점을 가진다. 하지만 이를 위해서는 변위기의 크기를 작게 하는 것이 중요하다. 그러나 선형 위상 배열 안테나의 경우에는 공간 상의 제약이 없으므로 이런 구조를 사용하는 것이 유리하다. 평면형 위상 배열 안테나를 제작하는 경우에 변위기의 크기를 더 이상 줄이기 어려운 경우 변위기와 급전선을

분리하고 이들을 via hole을 통하여 연결하는 방법을 제안하고자 한다.

### II. PIN 다이오드 위상 변위기의 설계

PIN 다이오드는 순 바이어스에서 작은 저항을 갖는 단락회로로, 역 바이어스에서 상대적으로 큰 리액티브 임피던스를 갖는 개방회로로 근사화 될 수 있다. 따라서 회로 내에서 PIN 다이오드를 순 바이어스와 역 바이어스로 개폐함에 따라서 RF 신호가 위상차를 갖도록 제어할 수 있다. 변위기를 설계하기 위해서는 우선 각각의 위상 비트에 알맞은 방식과 선택과 함께 다이오드에 대한 정확한 모델링이 중요하다. 특정한 위상 비트에 대한 선택은 전력수용능력, 다이오드의 수, 삽입손실, 그리고 회로의 크기와 복잡성을 고려해야 한다. 부하선로 방식은 위상차가 작을수록 순간피전력 수용 능력은 커지고 삽입손실은 작아진다. 따라서 22.5도와 45도 비트의 경우는 부하선로방식이 유리하다. 90도 비트의 경우 다이오드 수를 하나 줄일 수 있고 회로구조가 간단한 직-병렬형 가변선로 방식으로 설계하였다. 180 비트의 선택은 일반적으로 많이 쓰이면서 제작이 용이한 직렬형 가변선로 방식을 선택하였다.

모든 경우에 있어서 다이오드에 대한 정확한 모델링을 통해서 구한 회로의 초기값들은 실제 simulator와 거의 유사한 결과를 얻을 수 있다. 이를 위하여 다이오드를 원하는 주파수 값마다 S 파라미터 값을 구하고 이로부터 실수값과 허수값을 모두 가지는 임피던스를 구하여 회로 설계에 이용하였다.

#### 2-1 부하 선로형 위상 변위기

여기서 사용된 방식은 다이오드의 cathode에 stub가 달린 형태로 작은 리액턴스를 일정한 전송선로에

loading 하는 것으로 그 구조는 그림과 같다. 등가회로의 ABCD 파라미터를 계산하고 이를 S 파라미터로 변환하고 원하는 위상차를 얻기 위한  $Y_c$  와  $Y_{si}$  값을 얻는다. 다이오드의 여기에 다이오드를 모델링한 값을 이용하여 실제로 마이크로스트립 라인의 폭과 두께를 결정한다.

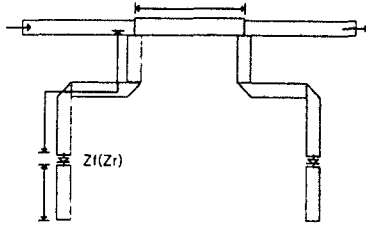


그림 1. 부하 선로형 위상 변위기

2-2. 직-병렬형 가변선로 방식

이 방식은 구조는 그림과 같으며 다이오드 D3 가 병렬 형태로 사용되며 전송 선로  $l_3$  의 길이는 등가적으로 다이오드를 단락된 상태로 유지하기 위하여  $\lambda/4$  의 값을 가진다. 모든 다이오드들이 순 바이어스된 경우 RF 신호는 윗 경로로 전송되고 역 바이어스된 경우 아래 경로로 전송된다.

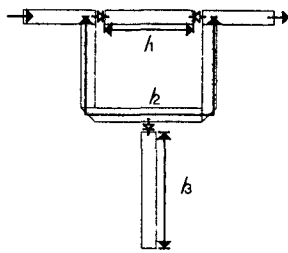


그림 2. 직/병렬형 가변 선로 위상 변위기

2-3 직렬형 가변선로 방식

180° 의 위상 변이를 얻기 위하여 사용된 직렬형 가변 선로 방식의 회로는 그림과 같다. 위의 짧은 경로가 순 바이어스인 경우 아래의  $l_2$  의 길이는  $\lambda/2$  이고 대부분의 RF 전력은 윗 경로로 전달된다. 반면에 아래의 긴 경로가 순 바이어스인 경우 아래 경로로 전달된다. 아래 경로의 길이는  $2l_2 + l_3$  이므로  $l_1$  이  $l_3$  보다  $\lambda/2$  만큼 길면 아래 경로가 위 보다  $\lambda/2$  만큼 길게 된다.

위 회로는 좌, 우 대칭이므로 even-odd mode analysis 를 이용하여 분석할 수 있다. B 점의 even, odd 전압을 구하고 이로부터  $S_{21}$  을 구하여 삽입손실과 위상차를 구할 수 있다.

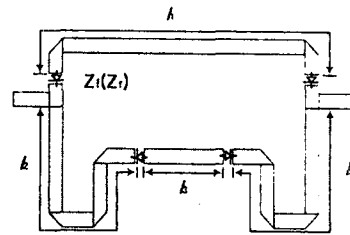


그림 3. 직렬형 가변 선로 위상 변위기

그림은 다이오드의 S-parameter로부터 Z parameter로 변환하여 분석한 삽입손실과 위상차는 단순히 RLC 회로로부터 구한 값보다 더욱 정확함을 보여주고 있다.

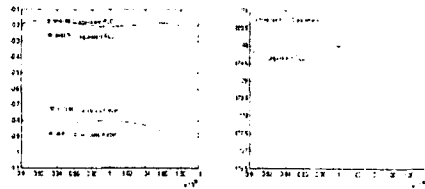


그림 4. 180도 비트의 삽입손실과 위상 차 예측

2-4 위상 변위기의 전체 구조와 성능

설계한 4 비트 위상 변위기의 구조는 아래의 그림과 같다. 설계는 ADS를 이용하여 design 한 후 최적화 하였고 다시 ensemble 을 이용하여 tuning 하는 방식을 이용하였다 사용된 pin 다이오드의 수는 11 개이고 각 비트마다 1~2 개의 bias 라인을 필요로 하며 총 5 개가 요구된다. Bias 라인은 정사각형의 pad 를 두어 이것을 radial stub 와 연결되어 DC 와 RF 를 분리한다. PIN 다이오드의 cathode 가 연결된 마이크로 스트립 라인에  $\lambda/4$  의 길이를 가지는 0.1mm 폭을 가지는 shorted line 을 사용하였다. DC 전압이 비트 상호간에 영향을 미치지 않도록 RF bypass 커패시터 사용되었다.

10GHz 를 중심으로 약 1GHz 의 대역폭을 가지며 대역 내에서 -15dB 이하의 반사계수를 가지며 양 바이어스 상태에서 어느 정도 일정한 삽입손실 값을 갖도록 설계하였다. 또한 최대 위상 오차는 180도.90도 비트의 경우 10도, 나머지 비트는 5도 이하가 되도록 한다. 설계된 변위기의 각 비트별 삽입 손실과 위상 차는 아래의 그림과 같다.

|           | 9.6 GHz | 9.8 GHz | 10 GHz | 10.2 GHz | 10.4 GHz |
|-----------|---------|---------|--------|----------|----------|
| 22.5° on  | -0.2 dB | -0.29   | -0.29  | -0.30    | -0.31    |
| 22.5° off | -0.39   | -0.35   | -0.33  | -0.33    | -0.33    |
| 45° on    | -0.46   | -0.47   | -0.47  | -0.48    | -0.51    |
| 45° off   | -0.47   | -0.40   | -0.37  | -0.37    | -0.39    |
| 90° on    | -0.72   | -0.68   | -0.65  | -0.62    | -0.59    |

|          |       |       |       |       |       |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 90° off  | -0.49 | -0.50 | -0.50 | -0.51 | -0.52 |
| 180° (1) | -0.96 | -0.99 | -1.05 | -1.13 | -1.23 |
| 180° (2) | -1.08 | -1.13 | -1.17 | -1.21 | -1.30 |

표 1. 각 비트별 상태에 따른 삽입 손실 (단위는 dB)

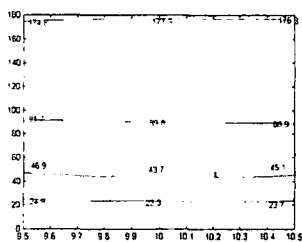


그림 5. 설계된 위상 변위기의 각 비트별 위상 차

### III. 4 bit 위상 변위기의 제작과 측정

제작된 위상 변위기는 그림과 같다. 전체 크기는 5cm×3cm 이고 radiator 와 결합할 수 있도록 작은 크기로 만들기 위하여 높은 유전율을 가지는  $\epsilon_r$ 이 9.8 이고 두께가 15mil 인 Rogers 사의 TMM-10i 기판을 사용하였다.

스위칭 소자로 사용된 PIN 다이오드는 HP 사의 HPND-4028 을 사용하였다. 순 방향으로 10mA 정도의 전류를 가하면 적은 전류를 가할 때 보다 작은 저항을 가지므로 순 방향에서의 삽입 손실이 감소한다. 이때 data sheet 에 제시된 바로는 전류의 변화에 의한 위상의 변화는 없으므로 전류의 크기는 손실에만 영향을 준다. 다이오드를 off 하기 위해서는 역 방향 전압을 걸어주면 다이오드의 isolation 특성이 개선되어 loss 를 감소시킬 수 있다. 하지만 실제 변위기 제작 시 예상보다 순 방향에서 다이오드의 bonding 에 의한 손실이 커서 역 방향에서의 isolation 특성 개선이 큰 의미가 없으므로 역 방향 전압은 0V 로 하였다.

비트 간의 DC 차단을 위한 capacitor 는 10GHz 와 같은 주파수에서 손실이 적은 di-lab 사의 millicap 을 사용하였다.

실제 제작된 위상 변위기의 측정 결과는 가변 선로 방식은 위상 오차가 다소 크게 나왔고 순 방향과 역 방향의 삽입손실의 차이도 크게 나왔다. 이는 설계 하기 전에 PIN 다이오드의 산란 계수를 TRL calibration 으로 바이어스 조건을 달리하면서 측정해 보면 bonding 에 의한 다이오드의 리액티브 성분의 변화를 고려할 수 있을 것으로 예상된다.

9.5~10.5 GHz 에서의 위상 변위 특성은 아래 그림과 같이 22.5° 비트는 22~26°, 45° 비트는 43~50°, 90° 비

트는 97~105° 그리고 180° 비트는 165~172° 있다.

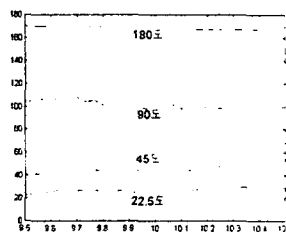


그림 6. 측정된 위상차

|    | 9.6 GHz | 9.8 GHz | 10 GHz | 10.2 GHz | 10.4 GHz |
|----|---------|---------|--------|----------|----------|
| 최저 | -3.78   | -3.59   | -3.48  | -2.83    | -2.63    |
| 최고 | -6.23   | -6.23   | -6.72  | -6.42    | -6.41    |
| 평균 | -5.05   | -4.82   | -5.31  | -4.85    | -4.58    |

표 2. 측정된 4 비트 삽입손실 (단위는 dB)

### III. 안테나의 설계

안테나는 2x2 소자에 하나의 변위기가 결합되므로 기본적으로 한 소자간 간격은 grating lobe 를 방지하기 위하여  $0.5\lambda_0$  이하여야 하고 빔의 scanning 을 위해서는 더 작을수록 유리하다. 이를 위하여 소자간 간격은  $0.45\lambda_0$  를 사용하였다. 이와 같은 sub-array 기법을 사용하는 경우 radiator 의 수가 변위기의 수가 2 배가 되므로 적은 수의 소자를 사용하는 것보다 높은 directivity 를 가진다. 또한 작은 소자 간 간격으로 인하여 side-lobe level 또한 감소한다. 하지만 sub-array 사이의 간격을  $1\lambda_0$  이하로 하기 위해서는 작은 크기를 가지는 radiator 의 선택이 중요하다. 이를 위하여 ring 형태의 소자를 사용하였다. 또한 변위기의 대역폭을 9.5~10.5GHz 이므로 안테나 또한 그 정도 혹은 이상의 대역폭을 가지도록 설계하였다. Radiator 는 SSFIP 형태를 사용하여 넓은 반사 계수 대역폭, 낮은 side lobe level 과 동시에 낮은 유전율로 인하여 surface wave 에 의한 scan blindness 현상도 완화시킬 수 있다. 급전기와 변위기를 포함하는 기판은 bonding 된 소자들로 인하여 ground 를 사용할 수 없으므로 가끔적 개구면의 크기를 작게 하여 front-to-back ratio 를 줄이고 안테나를 정합하는 방법을 사용하였다. 또한 원형 편파 특성과 반사 계수 특성의 향상을 위하여 2x2 소자에 대하여 sequential array 를 적용하였다. 설계, 제작된 2x2 소자의 다중 구조는 그림과 같다.

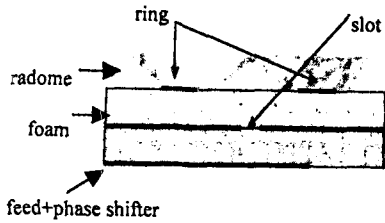


그림 7. 위상 배열 안테나의 다층 구조

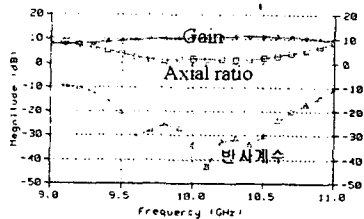


그림 8. 2x2 sequential 배열 안테나의 시뮬레이션 결과

그림은 sequential array를 2x2에 적용하여 simulation한 결과로 9.5~10.5 GHz에서 -20dB 이하의 반사 계수 특성과 -10dB 반사 계수 대역폭은 9~11 GHz의 20%를 가진다. 또한 axial ratio 대역폭은 3dB 기준으로 9.6~10.4GHz로 8%이며 Gain은  $0.45\lambda_0$ 의 소자 간격을 사용하였지만 약 1GHz 대역에서  $10\pm 1$ dB의 특성을 나타내었다. 또한 이러한 반사계수나 axial ratio 특성은 변위기의 여러 위상의 조합에서도 거의 비슷한 특성을 가지는 것을 simulation을 통하여 확인하였다. Gain 특성 또한 변위기의 삽입손실 만큼 감소한 것을 제외하고는 역시 여러 조합에서도 거의 동일한 특성을 보였다.

#### IV. 위상 배열 안테나

8x2 위상 배열 안테나는 sub-array 기법을 사용하여 적은 수의 변위기를 사용한 것에 비하여 좁은 빔 폭을 가지도록 설계하였다. 하지만 4개의 변위기의 조합으로 scan 할 수 있는 영역이나 그 분해능은 2배의 변위기를 사용하는 것보다는 감소한다.

낮은 side-lobe level을 가지는 위상 배열 안테나를 설계하기 위하여 4개의 변위기에 amplitude tapering을 줄 수도 있지만 beam 폭이 넓어지므로 균일한 급전 구조를 사용하였다. 균일한 급전 구조와 1:2:2:1의 급전 구조를 사용한 경우 변위기의 조합에 따른 예상되는 pattern은 다음과 같다.

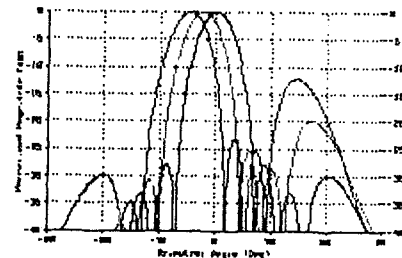
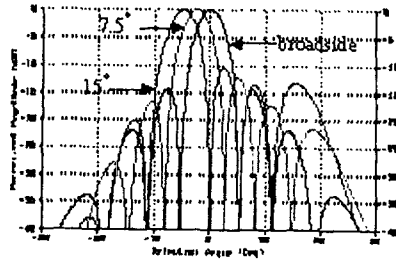


그림 9. 전력 분배에 따른 위상 배열 안테나의 빔스캔

아래의 그림은 설계된 8x2 위상 배열 안테나의 구조이다.

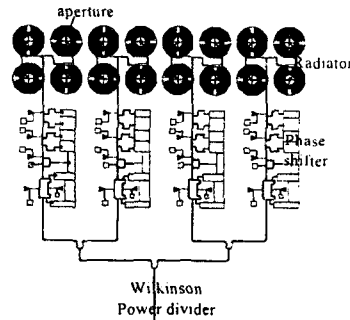
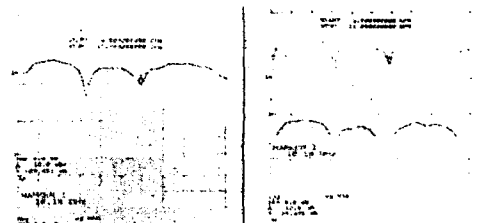


그림 10. 설계된 8x2 위상 배열 안테나의 구조

#### VII. 결과

제작한 8x2 위상 배열 안테나의 여러 위상 상태에서 중에서 대표적인 두 가지 경우의 반사 계수 특성은 아래의 그림과 같다.



(a) 동일한 위상 (b) 90도의 위상 차  
그림 11. 8x2 위상 배열 안테나의 반사 계수 특성

위의 그림과 같이 전체 안테나의 반사 계수 특성은 9.6 GHz와 10.2 GHz에서 이중 공진하는 특성을 보인다. 이는 2x2 안테나 자체의 이중 공진 특성으로 보인다. 그림 8과 같은 level로 공진하지만 10GHz 부근에서는 오히려 공진하지 않는다고 볼 수 있다. 이는 변위기와와의 조합, 높은 유전율을 가지는 기판의 사용으로 align에 의한 특성 변화 등이 크기 때문으로 분석된다.

제작한 8x2 위상 배열 안테나를 broadside 방향과 좌, 우 방향으로 최대 빔 스캔 한 경우의 빔 패턴은 다음과 같다.

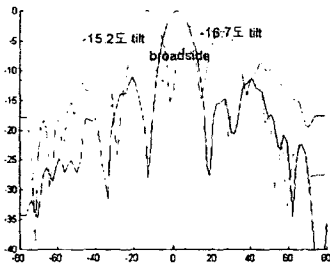


그림 11. 8x2 위상 배열 안테나의 빔 스캔 패턴

broadside 방향과 좌, 우 최대 빔 스캔 영역에서의 빔 스캔 각도와 directivity, gain, side lobe level 등은 아래의 표와 같다.

|             | broadside | 좌 스캔 시                    | 우 스캔 시   |
|-------------|-----------|---------------------------|----------|
| 빔조향 각       | 0         | -15.2°                    | 16.7°    |
| directivity | 16.11 dB  | 14.09 dB                  | 14.69 dB |
| gain        | 9.69 dB   | 6.74 dB                   | 8.30 dB  |
| SLL         | -11 dB    | -7 dB (1 st)<br>-4dB(max) | -7 dB    |

표 3. 8x2 위상 배열 안테나의 측정 결과

directivity에 비하여 gain 값이 작은 이유는 변위기의 손실과 유전율이 높은 기판을 사용함으로써 dielectric loss의 증가 등으로 예상할 수 있다. 또한 빔 스캔 시 일반적으로 side lobe level이 증가하는 scan loss 현상이 나타나므로 directivity와 gain이 감소한다. 또한 빔 스캔 시 side lobe의 증가는 너무 가까운 소자 간 간격으로 인한 coupling과 변위기의 불균일한 전력분배에 의한 결과로 분석된다.

### VII. 결론

본 논문에서는 X band에서 이동 목표물 탐지용 원형 편파 8x2 위상 배열 안테나를 설계, 제작하였다.

위상 변위기는 9.5~10.5 GHz에서 최대 위상 오차가 부하 선로 방식은 5° 내, 가변 선로 방식은 15°내의 값을 보였다. 삽입 손실도 10GHz에서 3.5~6.5 dB 정도, 평균 5dB 정도를 보였다. 변위기와 안테나의 결합은 sub-array 기법을 사용하여 2x2 sequential array에 하나의 변위기가 결합된 구조를 사용하여 높은 directivity와 넓은 대역의 원형 편파 특성을 얻었다. 소자간 간격은 sub-array 사용과 beam scan 시 grating lobe의 방지를 위하여  $0.45\lambda_0$ 를 사용하였다. 하지만 실제 측정된 결과 너무 가까운 소자 간격으로 인한 coupling 양의 증가로 특히 원형 편파 특성이 악화되었으며 side lobe level도 다소 증가하였다. SSFIP 형태의 안테나를 사용하여 넓은 반사 계수 특성을 얻었다. 측정 결과 beam tilt 각도는 90°의 위상차를 줄 경우 16°이다. 그리고 directivity는 16.11dB에서 14.69dB로 gain은 9.69dB에서 8.30dB로 빔 스캔 시 감소하였다. 8x8과 같은 2차원 위상 배열 안테나는 via를 이용한 급전기와 변위기를 multi-layer 적층 구조로 할 필요가 있으며 현재보다 더욱 소형화된 변위기가 요구된다.

### VII. 참고문헌

- [1] Shibani K. Koul, Bharathi Bhat, *Microwave and millimeter wave phase shifters*. Artech House.
- [2] I.J.Bahl, P.Bhartia *Microstrip antennas*. Artech House.
- [3] T.Teshirogi M Tanaka, and W.Chujo, "Wideband circularly polarized array with sequential rotations and phase shift of elements." Proceedings of the 1985 international symposium on antenna and propagation, Aug. 1985.
- [4] David M. Pozar, "Scan blindness in infinite phased arrays of printed dipoles," AP-32, no 6 June 1984
- [5] A. G. Derneryd, "A Theoretical Investigation of the Rectangular Microstrip Antenna Element," AP-26, no 4 July 1978